

水生生态修复对莲花湖底栖动物群落的影响^{*}钟非^{1, 2} 刘保元¹ 贺锋¹ 梁威¹ 成水平¹ 左进城^{1, 2} 吴振斌^{1 * *}(¹中国科学院水生生物研究所/淡水生态与生物技术国家重点实验室 武汉 430072; ²中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要 武汉莲花湖是典型的富营养化城市浅水湖泊. 通过对其进行 16 mo 的监测后发现, 治理后的小莲花湖比大莲花湖水质有明显改善. 监测期间小莲花湖底栖动物密度和生物量均值明显高于大莲花湖, Shannon 多样性指数与 Margalef 多样性指数也高于大莲花湖. 将大、小莲花湖的 10 种环境因子和底栖动物密度进行典型相关分析后, 发现总磷、温度、总氮、叶绿素 a、氨离子是对底栖动物群落具有显著性影响的环境因子. 图 8 表 3 参 20

关键词 水环境修复; 底栖动物; 生物多样性; 环境因子; 典型相关分析

CLC Q178.513

Effect of Aquatic Ecological Restoration on
Zoobenthos Community of Lotus Lake^{*}ZHONG Fei^{1, 2}, LIU Baoyuan¹, HE Feng¹, LIANG Wei¹, CHENG Shuiping¹, ZUO Jincheng^{1, 2}, WU Zhenbin^{1 * *}(¹State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China)(²Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract The Lotus Lake in Wuhan, consisting of two lakes (the small and big), is a typical urban shallow hypereutrophic lake. After continuous monitoring for 16 months, it was found that the aquatic environment in the small Lotus Lake was greatly improved compared with that in the big one, and also the average density, biomass, Shannon index and Margalef index of the zoobenthos in the small one were higher than those in the big one. Canonical correspondence analysis (CCA) was employed to identify the relationship between zoobenthos community and ten kinds of environmental factors. It was proved that total phosphorus (TP), temperature, total nitrogen (TN), Chl. a and NH₄-N were significant environmental factors influencing the zoobenthos community. Fig. 8, Tab 3, Ref 20

Keywords aquatic ecological restoration; zoobenthos; density; environmental factors; canonical correspondence analysis (CCA)

CLC Q178.513

莲花湖[φ(N) 30°33', λ(E) 114°16']位于武汉市龟山南脚下, 是一个典型的富营养化城市浅水湖泊. 莲花湖总面积8.5 × 10⁴ m², 分为大、小莲花湖, 其间通过一个直径不到 1 m 的涵洞相连, 除暴雨需要经过通江涵洞排涝时连通外, 一般为封闭状态. 小莲花湖面积约为 2.1 × 10⁴ m², 大莲花湖面积为 6.4 × 10⁴ m². 由于湖区处于武汉市中心, 其周边分布有许多排污口. 另外, 莲花湖地势低洼, 使其承受着严重的面源污染. 这些因素造成近年来大、小莲花湖水华频繁出现, 湖泊水生态系统遭受严重破坏. 为了改善莲花湖水环境质量, 逐步修复其水生态系统, 针对莲花湖水环境的特征, 围绕城市受污染水体水质改善、生态系统结构优化与系统稳定等问题, 实施了水生植物恢复、湖滨人工湿地构建、藻类控制等系列水生生态修复技术, 取得了

阶段性成果.

作为水生生态系统中的一个重要组成部分, 底栖动物对环境变化反应敏感, 当水体环境发生改变时, 底栖动物群落结构及多样性也将会相应发生改变. 因此, 其种类和群落特征作为环境评价指标在水库、湖泊、河流监测中得到广泛应用, 且相关报道较多^[1-3]. 本文以小莲花湖底栖动物群落作为研究对象, 与其紧邻的未采取治理措施的大莲花湖进行比较, 以期了解水环境修复过程中底栖动物在种类及优势种组成、密度、生物量及物种多样性等方面的变化, 探讨影响底栖动物群落结构的关键因子.

1 研究方法

1.1 采样时间和采样点的设置

2004 年 9 月至 2005 年 12 月, 底栖动物样本每月采集一次. 由于莲花湖面积较小, 大、小莲花湖分别设置两个采样点(图 1). 采样点水深 1.0 ~ 1.5 m.

1.2 底栖动物的采集与样品处理

底栖动物的定量采集用 1/16 m² 彼德生采泥器. 采集泥样后用孔径为 0.45 mm 筛网洗涤干净, 剩余物带回实验室完成样本清检、5% 福尔马林固定、种类鉴定、计数、称重及换算等工作.

收稿日期: 2006-03-22 接受日期: 2006-06-20

* 国家杰出青年基金项目(No. 39925007), 国家“十五”科技攻关项目(2002AA601021), 湖北省“十一五”科技攻关项目(2006AA305A03)和中国科学院知识创新工程重要方向项目(KSCX2-SW-102) Supported by the Outstanding Young Scientist Fund of the National Science Funds of China, the State "10th Five-Year-Plan" Key Sci & Tech Program, the Provincial "11th Five-Year-Plan" Key Sci & Tech Program of Hubei, China and the Knowledge Innovation Program of the Chinese Academy of Sciences

* * 通讯作者 Corresponding author (E-mail: wuzb@ihb.ac.cn)

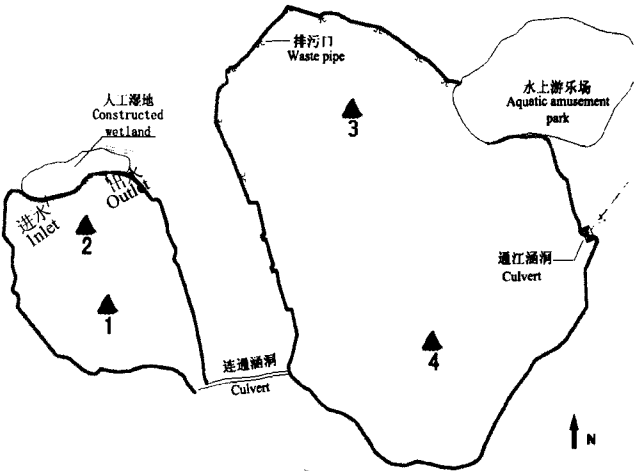


图 1 采样点的设置
Fig. 1 Sampling sites of the Lotus Lake

1.3 多样性指数计算

底栖动物多样性大小采用以下两种公式计算。
Margalef 多样性指数: $d = (S - 1) / \ln N$
Shannon - Wiener 多样性指数: $H' = -\sum [(n_i / N) \ln (n_i / N)]$
式中, S 为种类数, n_i 为 i 种的密度 (m^{-2}), N 为总密度 (m^{-2})。

1.4 水生植物生物量测定

小莲花湖沉水植物调查共设采样点 9 个(图 2), 每月使用带网铁夹 ($0.32\text{ m} \times 0.52\text{ m}$) 采集沉水植物, 采集后立即洗净并去掉枯根叶, 称其鲜重。

1.5 理化指标测定

底栖动物采样时现场测定水深、透明度、水温 (T)、pH、电导率 (Cond)、溶解氧 (DO), 并从采样点取 3 升水用于测定总

氮 (TN)、氨氮 ($NH_4\text{-N}$)、总磷 (TP)、化学需氧量 (COD_{cr})、生化需氧量 (BOD_5)、叶绿素 a (Chl. a)、总悬浮物 (TSS) 等指标。现场测定时, 分别采用 ORION Model 230、125、810 测定 pH 值、电导率、溶解氧, 其余水质指标均按《水和废水监测分析方法》^[4] 进行分析。

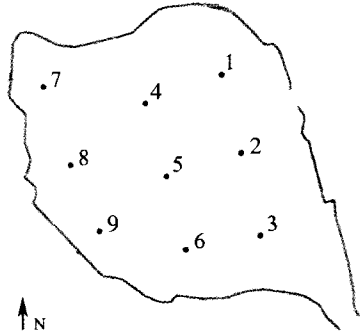


图 2 小莲花湖沉水植物采样点
Fig. 2 Distribution of sampling sites for aquatic macrophytes in the small Lotus Lake

1.6 统计分析

采用 SPSS 统计软件分析大、小莲花湖各种理化指标间、底栖动物种群间的差异以及沉水植物生物量与底栖动物生物量之间的相关关系。采用 Canoco 统计软件围绕各种环境指标与底栖动物群落结构进行典型相关分析^[5]。

2 研究结果

2.1 水体主要理化指标

表 1 为大、小莲花湖理化指标均值, 可见小莲花湖各指标均优于大莲花湖, 其中小莲花湖的 TSS、 $NH_4^+\text{-N}$ 、TN、TP、 COD_{cr} 、Cond 等指标和大莲花湖存在显著性差异, 说明小莲花湖水质已得到初步改善。

表 1 大、小莲花湖主要理化指标均值 (2004. 09 ~ 2005. 12)
Table 1 Comparison of physical and chemical factors (mean values) between the lakes from Sep., 2004 to Dec., 2005

湖泊 Lake	pH	$\rho / \text{mg L}^{-1}$						Chl. a ($\rho / \text{mg m}^{-3}$)	Cond ($\kappa / \mu\text{S cm}^{-1}$)
		TSS	DO	$NH_4^+\text{-N}$	TN	TP	COD_{cr}		
小莲花湖 Small Lotus Lake	8.55 (0.71)	18.3 * (10.5)	12.4 (3.4)	0.27 * (0.21)	2.13 * (1.50)	0.19 * (0.13)	30.9 * (12.1)	62.7 (71.8)	383 * (53)
大莲花湖 Big Lotus Lake	8.83 (0.82)	43 * (29.1)	13.3 (4.8)	1.65 * (1.34)	7.73 * (3.81)	0.69 * (0.60)	45.8 * (19.9)	209.2 (167.7)	438 * (34)

括号内为标准差, * 表示具显著性差异 ($P < 0.05$) The data in the blackets are standard deviation; * Significant difference ($P < 0.05$)

2.2 底栖动物群落结构

2.2.1 底栖动物的组成分布 经鉴定, 大、小莲花湖共发现底栖动物 11 种, 其中寡毛类 5 种, 水生昆虫 5 种, 其它动物 1 种 (表 2)。从群落的种类组成看, 在监测期间大、小莲花湖底栖动物种类数无差别且种类较贫乏。底栖动物群落主要由寡毛类和摇蚊幼虫组成, 摇蚊幼虫种群为广氧性的长足摇蚊 (*Tanytus* sp.) 和耐有机污染的大红德永摇蚊 (*Tokunagayusurika akamusi*)、羽摇蚊 (*Tendipes plumosus*) 组成, 它们均生长在营养盐较为丰富的水体中。如熊敏夫在调查了日本 23 个湖泊后指出, 羽摇蚊分布的湖泊的卡森指数 (TSI) 在 54 ~ 89 之间, 大红德永摇蚊分布的湖泊的卡森指数 (TSI) 在 45 ~ 75 之间, 都是富营养化湖

泊的指示种^[6, 7]。寡毛类为苏氏尾鳃蚓 (*Branchiura sowerbyi*), 霍甫水丝蚓 (*Limnodrilus hoffmeisteri*) 和正颤蚓 (*Tubifex tubifex*) 组成, 它们也都是在有机污染最严重的地方能生存下来的种类^[8]。

2.2.2 底栖动物的密度及生物量变化 由于 1[#]、2[#]间以及 3[#]、4[#]间不管是在底栖动物的密度 (1[#]、2[#]间 $P = 0.436$, 3[#]、4[#]间 $P = 0.404$) 还是在生物量 (1[#]、2[#]间 $P = 0.607$, 3[#]、4[#]间 $P = 0.324$) 上均无显著性差异, 在具体时空分析时分别将两样点取平均值进行研究。对比两湖底栖动物密度与生物量平均值, 发现两湖间密度 ($P = 0.001$) 与生物量 ($P = 0.002$) 均存在显著性差异。

表 2 大、小莲花湖底栖动物的种类平均丰度 (m^{-2}) (2004. 09 ~ 2005. 12)
Table 2 Mean abundance of zoobenthos in the lakes from Sep. , 2004 to Dec. , 2005

物种 Species	小莲花湖 Small Lotus Lake		大莲花湖 Big Lotus Lake	
	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]
寡毛类 <i>Oligochaeta</i>				
苏氏尾鳃蚓 <i>Branchiura sowerbyi</i>	24.06	20.88	1.25	2.69
中华河蚓 <i>Rhyacodrilus sinicus</i>	14.69	11.81	1.50	1.06
霍甫水丝蚓 <i>Limnodrilus hoffmeisteri</i>	6.50	2.06	0.13	0.31
巨毛水丝蚓 <i>L. grandisetosus</i>	0	0	0	0.06
正颤蚓 <i>Tubifex tubifex</i>	0	0.38	0.06	0.19
水生昆虫 <i>Aquatic insect</i>				
羽摇蚊 <i>Tendipes plumosus</i>	5.50	10.69	2.63	4.50
长足摇蚊 <i>Tanytus sp.</i>	13.31	7.25	7.06	8.19
大红德永摇蚊 <i>Tokunagayusurika akamusi</i>	6.38	2.31	0	0.38
摇蚊属 <i>Chironomus sp.</i>	0	0.0625	0.31	0.31
须蠓 <i>Palpomyia sp.</i>	0	0.19	0.25	0
其它 Others				
线虫 <i>Nematoda sp.</i>	1.13	1.19	0.13	0.06

小莲花湖底栖动物平均密度为 $1\,029\text{ m}^{-2}$ ($168 \sim 2\,640\text{ m}^{-2}$), 其中水生昆虫平均密度为 367.5 m^{-2} ($0 \sim 1\,376\text{ m}^{-2}$), 寡毛类为 642.5 m^{-2} ($120 \sim 1\,424\text{ m}^{-2}$); 而大莲花湖底栖动物平均密度仅为 246 m^{-2} ($32 \sim 968\text{ m}^{-2}$), 其中水生昆虫平均密度为 186.5 m^{-2} ($0 \sim 936\text{ m}^{-2}$), 寡毛类为 58 m^{-2} ($8 \sim 152\text{ m}^{-2}$). 小莲花湖底栖动物平均生物量为 9.94 g/m^2 ($0.712 \sim 32.95\text{ g/m}^2$), 其中水生昆虫平均生物量为 4.922 g/m^2 ($0 \sim 20.12\text{ g/m}^2$), 寡毛类为 4.975 g/m^2 ($0.576 \sim 14.48\text{ g/m}^2$); 而大莲花湖底栖动物平均生物量仅为 1.543 g/m^2 ($0.176 \sim 3.688\text{ g/m}^2$), 其中水生昆虫平均生物量为 1.151 g/m^2 ($0 \sim 3.312\text{ g/}$

m^2), 寡毛类为 0.377 g/m^2 ($0 \sim 1.624\text{ g/m}^2$). 通过比较可知, 小莲花湖底栖动物密度和生物量均大于大莲花湖.

由图 3、4 可知, 2005 年小莲花湖底栖动物密度在 3 月最高, 8 月最低, 其中水生昆虫与寡毛类均在 3 月最高; 大莲花湖底栖动物密度在 7 月最高, 11 月最低, 其中水生昆虫密度在 7 月最高, 寡毛类密度在 3 月最高. 小莲花湖底栖动物生物量在 3 月最高, 8 月最低, 其中水生昆虫与寡毛类均在 3 月最高; 大莲花湖底栖动物生物量在 2 月最高, 11 月最低, 其中水生昆虫生物量在 2 月最高, 寡毛类生物量在 5 月最高.

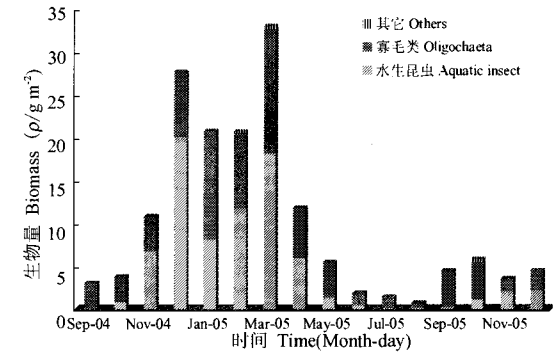
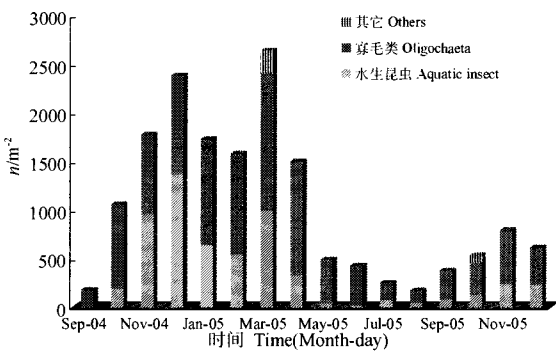


图 3 小莲花湖底栖动物密度与生物量

Fig. 3 Changes in density (m^{-2}) and biomass (g/m^2) of zoobenthos (Sep. , 2004 ~ Dec. , 2005) in the Small Lotus Lake

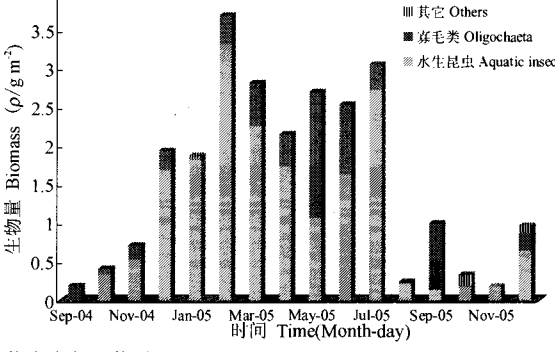
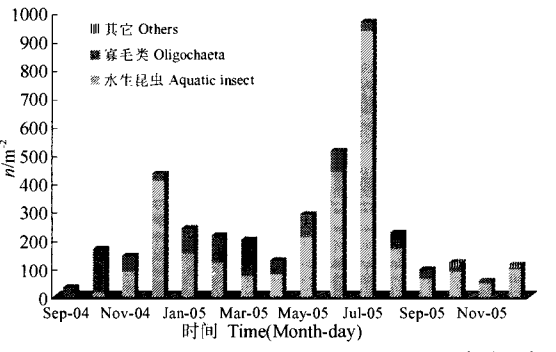


图 4 大莲花湖底栖动物密度与生物量

Fig. 4 Changes in density (m^{-2}) and biomass (g/m^2) of zoobenthos (Sep. , 2004 ~ Dec. , 2005) in the Big Lotus Lake

2.3 生物多样性

生物多样性指数是把群落结构的某些信息通过公式处理

后用综合指数予以表达, 是对群落结构的一种简化的反映. 由于 Shannon 生物多样性指数和 Margalef 生物多样性指数能较

好反映生物群落结构特征^[9],本文主要采用以上两种指数来对采样期间大、小莲花湖底栖动物多样性变化情况进行研究。

Shannon 多样性指数同其它生物指数和记分制相比较为客观,在评价无机毒物污染方面比有机污染的应用范围更为广泛^[10]。根据我国具体情况,用该指数值评价水质时其标准为:指数值大于 3 为清洁水体;3~2 为轻度污染;2~1 为中度污染;小于 1 为重污染;0 为严重污染^[11]。由图 5 可知,除 2004 年 9 月和 2005 年 6 月以外,小莲花湖底栖动物 Shannon 多样性

指数均在 1~2 之间,而大莲花湖底栖动物 Shannon 多样性指数除 2004 年 9 月和 2005 年 5 月以外均小于小莲花湖,并且大都小于 1。根据该指数的评价标准,小莲花湖属于中度污染,而大莲花湖则属于重度污染。经过 Margalef 多样性指数公式计算得知,检测期间小莲花湖 Margalef 多样性指数大都大于大莲花湖(图 5)。这也进一步说明,小莲花湖经过治理后污染情况已有一定改善。

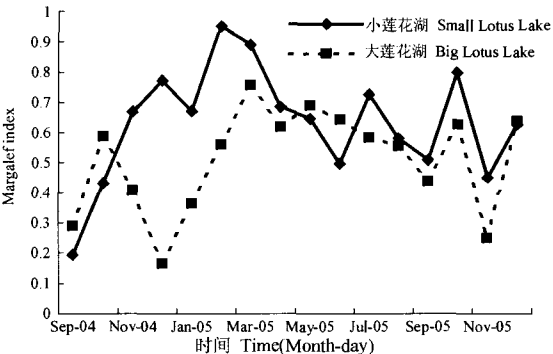
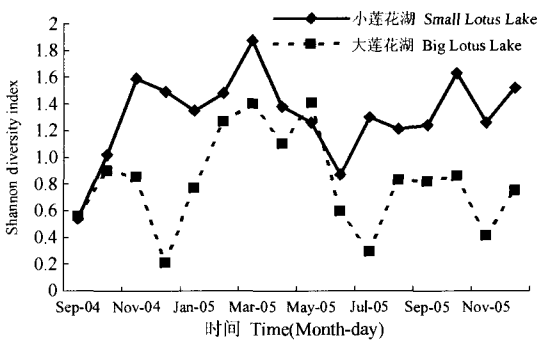


图 5 大、小莲花湖 Shannon 多样性指数与 Margalef 多样性指数变化
Fig. 5 Changes in Shannon index and Margalef index in the lakes

2.4 底栖动物群落与水体理化指标的关系

经过筛选,最后选用 10 种理化指标(DO、pH、Cond、T、TN、NH₄-N、TP、TSS、COD_{cr}、Chl. a)与底栖动物密度进行典型性相关分析。对大、小莲花湖底栖动物与环境关系的排序结

果以及各采样点与环境关系的排序结果如图 6。图 6 中前两个排序轴的特征值分别为 0.253 和 0.182,种类和环境因子排序轴的相关关系高达 0.875 和 0.864,说明排序图能很好地说明表 3 中的信息。

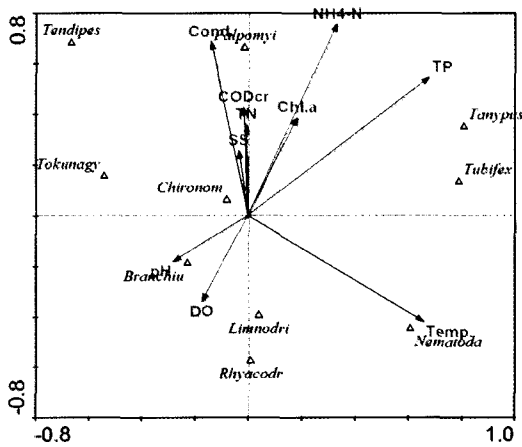


图 6 莲花湖底栖动物与环境因子的 CCA 二维关系排序图

Fig. 6 CCA two-dimensional ordination diagram of zoobenthos - environmental factors in the Lotus Lake

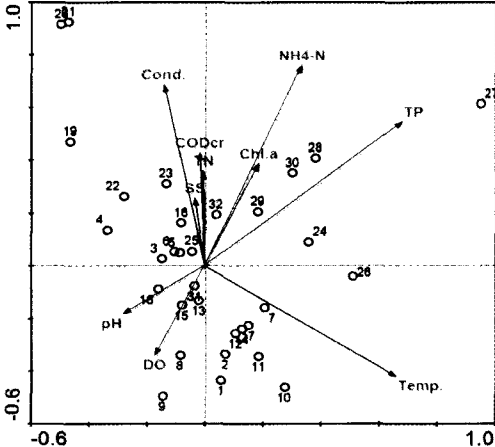


图 7 莲花湖 32 个采样点与环境因子的 CCA 二维关系排序图

Fig. 7 CCA two-dimensional ordination Diagram of samples - environmental factors in the Lotus Lake

表 3 具显著性影响的环境因子与 CCA 前两轴间的相关系数
Table 3 Correlation matrix showing the relationship between species axes and significant ($P < 0.05$) environmental factors

环境因子 Environmental factors	Ax1	Ax2
TP	0.5937	0.4779
T	0.5830	-0.3519
TN	-0.0032	0.3223
NH ₄ ⁺ -N	0.2905	0.6657
Chl. a	0.1618	0.3375
Eigenvalue	0.253	0.182
Cumulative percentage variance of species - environment relation	38.6	66.5

通过 Monte Carlo 测试^[5], TP 为影响莲花湖底栖动物群落的最重要的因子($P=0.002$),其它具有显著性影响的因子为 T($P=0.002$)、TN($P=0.002$)、NH₄⁺-N($P=0.03$)、Chl. a($P=0.038$),这些因子与 CCA 前两轴之间的相关系数如表 3 所示。其中,TP 与第一轴的相关性最大,相关系数为 0.593 7,且为正相关,其次为 T,相关系数为 0.583 0, NH₄⁺-N、Chl. a 表现出一定程度的正相关。与第二轴的相关性, NH₄⁺-N 表现出较强的正相关,相关系数高达 0.665 7,其次为 TP,相关系数 0.477 9。TN、Chl. a 表现出一定程度的正相关, T 为负相关。

如图 6 所示, 长足摇蚊与总磷呈正相关, 羽摇蚊和大红德永摇蚊与温度呈负相关, 霍甫水丝蚓、中华河蚬和苏氏尾鳃蚬与溶解氧浓度呈正相关, 与总氮、氨氮、总磷、叶绿素呈负相关。图 7 中 1~16 依次为小莲花湖底栖动物各月份 (2004. 09 ~ 2005. 12) 的采样点, 17~32 为大莲花湖底栖动物各月份 (2004. 09 ~ 2005. 12) 的采样点。由图可知, 与第一轴呈正相关的为大莲花湖 6~10 月份采样点, 总磷和温度较高; 与第一轴呈负相关的为大小莲花湖 11~次年 2 月份采样点, 温度较低。与第二轴呈正相关的为污染较为严重的大莲花湖采样点; 与第

二轴呈负相关的为得到初步改善的小莲花湖各采样点。

2.5 底栖动物生物量与沉水植物生物量的关系

由于 2004 年 10 月以前以及 2005 年 4~7 月在小莲花湖进行了沉水植物种植与收割等一系列人为干扰, 故数据没有列出。由图 8 可知, 小莲花湖底栖动物生物量的变化趋势和所调查的沉水植物生物量类似。经过 SPSS 统计软件对底栖动物生物量和沉水植物生物量进行相关分析, 发现两者呈显著正相关 ($r=0.728$, $P=0.011$), 相关方程为 $y = 3.965 + 0.3004x$ 。

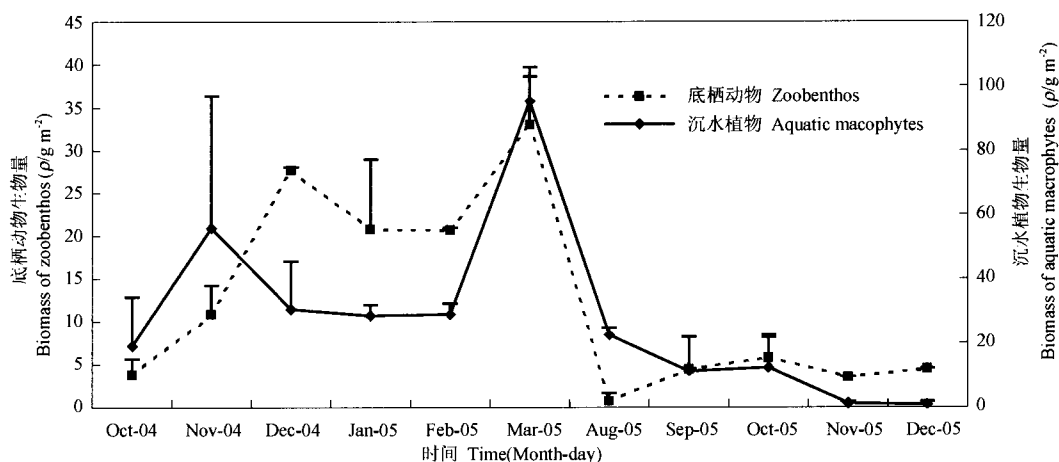


图 8 小莲花湖底栖动物与沉水植物生物量变化情况

Fig. 8 Changes in the biomass of zoobenthos and aquatic macrophytes in the Small Lotus Lake

3 讨论

调查期间, 大、小莲花湖底栖动物种群不管是在密度还是在生物量方面都出现了一定程度的波动。底栖动物种群波动主要归因于理化指标和生物指标两方面。在理化指标方面, 依据 Monte Carlo 测试所筛选出来的 TP、T、TN、 NH_4^+-N 和 Chl. a 等具有显著性影响的环境因子中, TP、TN、 NH_4^+-N 相当于水体营养盐污染程度。熊金林等^[12]发现, 长足摇蚊密度与营养状态指数 (TLI) 呈明显正相关 (相关方程 $\text{TC} = -1815.6 + 41.63 \text{TLIc}$, $r=0.9734$, $P<0.01$)。龚志军等^[13]也发现, 随着湖泊营养水平的提高, 霍甫水丝蚓和长足摇蚊密度将会增加, 另外长足摇蚊还表现出一定程度的单峰分布, 即当营养水平达到一定程度时长足摇蚊密度反而降低。本文通过典型性相关分析发现, 长足摇蚊密度与水体 TN、 NH_4^+-N , 特别是 TP 呈正相关, 而霍甫水丝蚓、中华河蚬和苏氏尾鳃蚬则与 TN、 NH_4^+-N 、TP 呈不同程度的负相关。长足摇蚊的变化趋势与上述研究结果^[12, 13]相同, 而这 3 种寡毛类表现出与营养水平的负相关可能类似龚志军等研究中出现的单峰分布的情况^[13~15]。由于监测期间, 大莲花湖仍然暴发了蓝藻水华, Chl. a 也能在一定程度上反映蓝藻水华暴发的程度。3 种寡毛类表现出与 Chl. a 的负相关, 可能表明寡毛类对蓝藻水华的耐受性要低于摇蚊幼虫。而 T 作为仅次于 TP 具有显著性影响的环境因子, 所反应的是一种季节变化。刘保元等^[16]认为, 温度是重要的环境因子, 底栖动物的密度和生物量季节变动明显, 现存量在春、夏季较低, 而在秋、冬季较高, 因为底栖动物的季节变动规律与其生殖季节及发育越冬过程有较密切的关系。小莲花湖底栖动物密

度和生物量在较冷的秋季、冬季以及初春较高, 而在夏季较低, 与刘保元等^[16]报道规律相似, 特别是水生昆虫, 夏季密度和生物量都最低, 如羽摇蚊和大红德永摇蚊与温度呈负相关, 这主要是因为它们一般以幼虫过冬, 故温度低时密度较高, 而次年春、夏季摇蚊幼虫逐步羽化离开水体, 所以夏季密度较低; 大莲花湖底栖动物密度和生物量的波动规律不明显, 这可能是由于未经治理的大莲花湖生态系统处于不稳定的状态, 造成优势种不停的变动。虞左明^[17]认为, 群落的密度和生物量之间变动的一致性取决于群落的优势种类组成是否有变化, 只有当群落的优势种群的分布和变化比较稳定时, 群落的密度和生物量的变化才会基本一致。小莲花湖底栖动物密度和生物量季节变动规律基本一致, 而大莲花湖底栖动物密度和生物量的变化却没有联系, 这说明了小莲花湖底栖动物优势种群的分布和变化比大莲花湖稳定。

根据典型性相关分析的结果, 参与分析的 10 种理化指标能解释引起莲花湖底栖动物种群数量波动因素的 59%, 另外 41% 的因素则要从生物指标上去探讨。生物指标对莲花湖底栖动物的影响主要包括水草和鱼两方面。关于沉水植物对底栖动物的影响, 在刘保元等^[18]和陈洪达^[19]等所做的研究中发现, 软体动物的生物量与沉水植物生物量有明显的相关关系。通过对小莲花湖的沉水植物生物量的调查发现, 其与底栖动物生物量也有显著相关关系。对于小莲花湖的鱼类, 虽然在 2003 年 6 月就进行了清除, 但在经历了随后的水草引进以及其它一些情况后, 又大量繁衍起来。据调查主要为鲫 (*Carassius auratus*)、鲤 (*Cyprinus carpio*) 和乌鳢 (*Ophiocephalus argus*), 3 种鱼一定年龄的个体都喜食底栖动物^[20]。它们在温度较高时活动频繁, 会

对底栖动物造成摄食压力,这也可能是造成小莲花湖 2005 年底栖动物密度和生物量低于 2004 年相同月份以及底栖动物夏季密度和生物量偏低的一个重要因素。

4 结论

经过一系列生态修复技术的实施,小莲花湖生态环境得到一定程度的改善。小莲花湖主要理化指标都明显好于大莲花湖,沉水植物也得到了一定程度的恢复,这使得除长足摇蚊外,小莲花湖常见底栖动物种群密度、生物量均值明显高于大莲花湖。但是作为恢复湖泊水环境生态的一个重要环节,底栖动物种群的恢复也不能单纯局限于密度和生物量的提高,健康而稳定的群落结构需要较高的物种多样性。小莲花湖底栖动物种群虽然得到一定程度恢复,但是其多样性指数只是在 1~2 之间波动,物种数目也没有增多。这说明单靠湖泊生态系统自我恢复,或是仅依靠种植沉水植物时外来底栖物种的带入,对底栖动物多样性的影响都是有限的。如何促进湖泊底栖动物种群的恢复,还需要进一步深入研究。

致谢 张甬元先生在实验中给予了指导,付贵萍、吴晓辉、周巧红、张晟、肖恩荣、于涛、张金莲、肖惠平、吴娟、何起利、谢小龙、袁莉英、吴灵琼以及其他课题组成员在工作中提供了支持。

References

- Liu BY (刘保元), Wang SD (王士达), Wang YM (王永明), Huang HM (黄浩明). In evaluation of pollution of Tumen River by using macroinvertebrate benthos. *Acta Sci Circumst* (环境科学学报), 1981, 1 (4): 337~348
- Ma XF (马徐发), Xiong BX (熊邦喜), Wang MX (王明学), Wang YD (王银东), Wang WM (王卫民), Liu XL (刘小玲), Xu MS (徐木生), Zhang LL (张林林), Hu QS (胡秋生), Wang XB (王喜波). The community structure and biodiversity of macrozoobenthos in Daoguanhe Reservoir, Hubei Province. *J Lake Sci* (湖泊科学), 2004, 16 (1): 49~55
- Liu GC (刘国才), Lai Wei (赖伟), Yin HW (殷浩文), Gu FK (顾福康). A study on macroinvertebrate of the Suzhou River, Shanghai. *Chin Environ Sci* (中国环境科学), 2001, 21 (2): 112~114
- 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法. 第3版. 北京: 中国环境科学出版社, 1989
- Ter Braak CJF, Verdonschot PFM. Canonical correspondence analysis and related multivariate methods in aquatic ecology. *Aquat Sci*, 1995, 57 (3): 255~289
- Iwakuma T, Yasuno M, Sugaya, Y, Sasa M. Three large species of Chironomidae (Diptera) as biological indicators of lake eutrophication. In: Yasuno M, Whitton BA. Biological Monitoring of Environmental Pollution. Tokyo: Tokai University Press, 1988
- Iwakuma T, Yasuno M. Chironomid populations in highly eutrophic Lake Kasumigaura. *Verh Int Ver Limnol*, 1981, 21: 664~674
- Brinkhurst RO. The Benthos of Lake. New Jersey: The Blackburn Press, 1974
- 颜京松. 应用水生生物群落评价水质的一些数学公式. 中国科学院水生生物所编. 环境污染与生态学文集. 南京: 江苏科学技术出版社, 1981
- James A, Evison L. Biological Indicators of Water Quality. New York: John Wiley and Sons, 1979
- Liu BY (刘保元), Wang SD (王士达), Hu DL (胡德良). An evaluation on pollution in the Xiangjiang River by using zoo-benthos. *Acta Hydrobiol Sin* (水生生物学集刊), 1984, 8 (2): 225~236
- Xiong JL (熊金林), Mei XG (梅兴国), Hu CL (胡传林). Comparative study on the community structure and biodiversity of zoobenthos in lakes of different pollution states. *J Lake Sci* (湖泊科学), 2003, 15 (2): 160~168
- Gong ZJ (龚志军), Xie Ping (谢平), Tang HJ (唐汇涓), Wang SD (王士达). The influence of eutrophication upon community structure and biodiversity of macrozoobenthos. *Acta Hydrobiol Sin* (水生生物学报), 2001, 25 (3): 210~216
- Milbrink G. An improved environmental index based on the relative abundance of Oligochaeta species. *Hydrobiologia*, 1983, 102 (2): 89~97
- Gyorgy D, Judit M. An attempt to trace eutrophication in a shallow lake (Balaton, Hungary) using chironomids. *Hydrobiologia*, 1983, 103 (1): 169~175
- Liu BY (刘保元), Liang XM (梁小民). Effects of waterbody acidification on zoobenthos in the Chongqing area. *J Lake Sci* (湖泊科学), 1997, 9 (3): 238~243
- Yu ZM (虞左明). A preliminary investigation on macrozoobenthos communities of the Qingshan Lake. *Environ Poll & Control* (环境污染与防治), 2001, 23 (5): 229~231
- Liu BY (刘保元), Qiu DR (邱东茹), Wu ZB (吴振斌). Effects of reestablishment of aquatic macrophytes on zoobenthos in a eutrophic shallow lake. *Chin J Appl Environ Biol* (应用与环境生物学报), 1997, 3 (4): 323~327
- 陈洪达. 放养草鱼对东湖生态系统的影响. 刘建康主编. 东湖生态学研究. 北京: 科学出版社, 1990. 388~394
- 湖北省水生生物研究所鱼类研究室编. 长江鱼类. 北京: 科学出版社, 1976